浅水声速剖面用经验正交函数 (E0F) 表示的 可行性研究

沈远海 马远良 屠庆平 姜小权

(西北工业大学航海工程学院 西安 710072) 1998 年 4 月 8 日收到

摘要 本文研究利用经验正交函数 (EOF) 及少量参数以近似表示实测浅水声速剖面的方法,研究了 样本数,不同浅水域的样本和算法的关系,并得出结论:一定区域的浅水声速剖面,以经验正交函数 (EOF)近似表示,仍可以达到较好的精度。这对于声场层析及被动定位问题有着很重要的意义。 关键词 浅水,声速剖面,经验正交函数 (EOF)

Feasiblity of description of the sound speed profile in shallow water via empirical orthogonal functions (EOF)

Shen Yuanhai Ma Yuanliang Tu Qingping Jiang Xaioquan (College of Marine Engineering, Northwest Polytechnical University, Xian 710072)

Abstract This paper uses a few parameters to describe the samples of the soundspeed profile in shallow water via empirical orthogonal functions (EOF), discusses the relationship between the alogorithm and the number of the samples taken from different shallow water areas, then comes to the conclusion that a particular sound-speed profile in shallow water can be described approximately by the EOF with proper precision. The conclusion is important to acoustic tomography and passive localzation.

Key words Shallow water, Sound-speed profile, Empirical orthogonal functions (EOF)

1 引言

在水声信号处理中,水声物理环境的描述 是实现多种声场模型的重要组成部分。声速 对声传播有着重要的影响;"声速剖面"表现 的是声速和深度的函数关系,它在匹配场处理 (MFP)、被动定位问题的研究中起着重要的 作用。声速剖面通常用一系列声速和深度的数 应用声学 值关系来描述,用这种方法完全模拟实际环境 中的声速剖面需要大量的参数。声速和水的盐 度,温度等都有一定的关系,其中在一定区域 内,由于盐度相对稳定,使得温度对声速影响 最大。在深水环境下,由于水面附近声速仅为 总声速剖面的很小一部分,而阳光,大气温度 这样一些因素对一定深度下的海水温度影响不 大,这里的声速剖面变化较平缓,利用经验正

 $\cdot 21 \cdot$

交函数表示声速剖面,在文献^[1]中已证明是可 行的,在这方面已有大量的声速采集与记录工 作^[4]。但对于浅水的情况下,由于深度有限, 水面附近的声速已成为声速剖面的重要组成部 分,局部对流已经变成了重要的热交换。阳光, 大气温度对于浅水温度的影响很大,使得声速 剖面在浅水环境下变化相当剧烈。在这种浅水 环境下,利用经验正交函数来表示声速剖面是 否可行需要实测数据验证。本文通过南海北部 近岸区域的实测数据,以及抚仙湖四季实测样 本进行了研究,可以得到结论:一定区域的浅 水声速剖面以经验正交函数(EOF)近似表示, 仍可以达到较好的精度。在浅水声场层析和被 动定位的工作中,声速剖面用较少的参数进行 表示,可以大大减少所需要搜索的参数。

2 数据来源

本文所采用的数据为南海浅海的实测数据 和抚仙湖四季的实测样本。所采样的南海浅海 为较理想的具有稳定传递函数的开阔浅海,而 抚仙湖湖面开阔,湖底相对平坦,是一个相当 稳定的声传播信道。并且由于地处云南高原, 日光照射强烈,在湖面附近会形成变化剧烈的 温度分布,使声速剖面在一年中变化很大。这 两个区域代表着两种典型浅水区域: 浅海和内 陆湖泊,其结果具有较大的说服力。由于所获 取的抚仙湖样本数目很多,可以通过样本数目 的改变,来观察拟合的结果,而南海浅海的样 本由于样本较少就没有做类似的研究。

3 基本原理^[1]

假设取 N 个己知的声速剖面样本,在实际 的采样数据中,由于实验条件的限制,采样没 有可能完全在等距离点处进行。而在声场计算 中,采用矩阵运算,需要等距离点的采样值。因此在采样点之间采用三次样条插值^[2],可以得到等距离点处的声速,假设等距离点处的深 度为 *ih*(*i* = ···*K*)。若样本总数为 *N*,则 *N* 个声速样本可表示成矩阵形式为

$$C = \begin{vmatrix} c_1(0) & c_1(h) & \cdots & c_1(Kh) \\ c_2(0) & c_2(h) & \cdots & c_2(Kh) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_N(0) & c_N(h) & \cdots & c_N(Kh)_n \end{vmatrix}$$
(1)

定义 *R* 为 *C* 的协方差矩阵,其中每一个元素 *r_{ij}* 为 _N

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} [c_n(z_i) - \overline{c}(z_i)]$$

$$* [c_n(z_j) - \overline{c}(z_j)]$$

$$i, j = 0 \cdots K$$
(2)

其中 c 为 N 个声速采样数据的平均值。求出此 矩阵的特征值和特征向量,其特征向量就是所 求的经验正交函数,有

$$RF = \triangle F$$
 (3)

ī.

其中 $\Delta_{ij} = \lambda_i \delta_{ij}$ $i, j = 0 \cdots K$ (4) λ_i 为矩阵 *R* 的特征值。 *F* 为矩阵 *R* 的特征向 量所组成的矩阵,与特征值相对应的纵向量即 为特征向量:

$$F(z_{ih}) = (f_0(z_{ih}), \cdots f_k(z_{ih}) \quad i = 0 \cdots K \quad (5)$$

 $f_k(z_{ih}), k, j = 0 \cdots K$ 即为所确定的经验正交函数。于是任意一点的声速值则可以表示为

$$c_n(x,y,z_i) = \overline{c}(z_i) + \sum_{k=0}^K \alpha_k(x,y) f_k(z_i) \quad (6)$$

对任意一个数据样本声速剖面,则可表示为:

$$\begin{bmatrix} c_i(0) \\ \vdots \\ c_i(Kh) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{c}(0) \\ \vdots \\ \overline{c}(Kh) \end{bmatrix} + [f_0(z) \cdots f_K(z)] \begin{bmatrix} \alpha_0(x,y) \\ \vdots \\ \alpha_K(x,y) \end{bmatrix}$$
(7)
18 卷 2 期 (1999)

· 22 ·

将右边第一项左移, (7) 可表示为

$$\begin{bmatrix} c_n(0) - \overline{c}(0) \\ \vdots \\ c_n(Kh) - \overline{c}(Kh) \end{bmatrix} = [f_0(z) \cdots f_K(z)] \begin{bmatrix} \alpha_0(x,y) \\ \vdots \\ \alpha_K(x,y) \end{bmatrix}$$
(8)

公式 (8) 是由 K+1 个未知数、K+1 个线 性方程组成的,因此可求出不同的 α 函数,然 后可以依照 (7) 式进行拟合。若求得的矩阵 (1) 中的特征值有少数几个特征值的绝对值远远大 于其余的特征值,这时用较少的 α 参数来表征 声速剖面是可行的。可以由大到小选定较大绝 对值的特征值所确定的经验正交函数 ^[3]。假 设由此而选定了 p 个经验正交函数,一般选定 p << K,方程组 (8)则变为由 p 个未知数、 K+1 个线性方程组成的一个超定的系统,对 此利用 QR 分解的方法来求出在最小二乘意义 下的最优结果。于是可用求得的参数来拟合不 同的声速剖面。

4 仿真结果

应用声学

采用实测南海北部近岸区域的声速数据, 样本数为 N=31,可以得到典型南海声速剖面 声速在 0-300m 的采样值。相邻两等距离点的 距离为 5m,采用三次样条插值的方式,可以 确定多个样本等距离点处的声速。并可得到平 均声速剖面如图 1 所示。同理,可以得到抚仙 湖的平均声速剖面 0-120m 的采样值,相邻两 等距离点的距离为 2m。由于所获的抚仙湖的 样本较多,可以先取少量的样本 N=30,其样 本采样时间分布在 11 月到 1 月之间。再取大 量的样本数 N=97,其样本采样时间分布在全 年。图 2 中点划线表示的为冬天的平均声速剖 面,实线表示的是全年的平均声速剖面。

从抚仙湖的平均声速剖面来看,全年平均 声速大于冬天的平均声速。这是由于冬天气温 低,导致声速较低,体现了温度对声速的影响。 另外,由于海水中盐度的影响,图1中海水的 声速明显大于图2中湖水的声速。

取由协方差矩阵 (l) 确定的绝对值最大的



三个特征值所对应的经验正交函数,则经验正 交函数如下所示:图3表示的是南海近岸区域 31个浅海样本所确定的三阶EOF,图4中实 线为抚仙湖中97个样本确定的EOF,点划线 为湖中30个样本确定的EOF,可以看出,不

· 23 ·

同的样本和样本数产生不同的 EOF。



从两组原始样本中各任选一组样本进行拟 合。图 5 中实线为南海近岸区域的原始样本, 图中的误差在 1m/s 以内。图 6 中抚仙湖的样 本为冬天的同一个样本在两个不同的样本空间 进行拟合的声速剖面。'+'为 30 个样本所 拟合的声速剖面。'o'为 97 个样本拟合的 声速剖面。可以看出,虽然全年和冬天的声速 剖面差别很大,但选取差别很大的剖面样本, 综合在一起进行统计,其图中误差最大处只有 3m/s。图 6 并且反映出样本数目变化后,拟 合的结果也是有所变化的,这是由于不同的样 本空间中,平均声速剖面和 EOF 函数的差别 造成的。



因样本数非常大,随机抽取不能看出拟合的统计结果如何,可用每个样本的最大误差,以及不同深度的最大误差来显示拟合的结果。另外可以定义每个样本的均方估计误差和不同深度的均方误差. *MSE* =

 $\frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum [c_e(z_i) - c_m(z_i)]^2}$ 从结果中可以看到 整体拟合的效果。

从图 7 和图 8 结果可以看出,南海浅海水 域最大误差沿深度和样本序号分布曲线的平均 值约为 2m/s,最大值为 3.3m/s,而均方误差 则小得多,在 1m/s 以下。这表明南海实测的 样本用 EOF 函数近似表示,可以达到较好的 精度。



18卷2期(1999)

大误差沿深度和样本序号分布曲线的平均值 在 3m/s 左右, 个别点的拟合效果较差, 达到 8m/s。而均方误差则在 2m/s 以下。在深水处 比浅水处拟合效果要好,都在 1m/s 以下。从 整体来看,抚仙湖实测的样本仍可用 EOF 函 数近似表示出来,但在靠近水面 60m 米以内 不甚理想,使用时应予注意。

3. 0 (s, m) 2.5 最大误差和均方误差 2.0 1.5 1. 0. 5 C 0 20 40 60 80 100 120 深度 (m)

图 9 抚仙湖 30 个样本最大和均方误差沿深度分布



样本序号分布

5 结论

本文通过实测的南海浅海数据和抚仙湖数 据,利用标准经验正交函数,以较少的参数来 确定声速剖面。选用较大的三个特征值所对应 的标准经验正交函数,从拟合的结果看,均方 误差在南海浅海水域和抚仙湖 60m 以下水域 可达到 1m/s 左右, 抚仙湖 60m 以上 (接近水 面)水域均方误差亦不超过 2m/s。从而得出

结论:一定区域的浅水声速剖面,以经验正交 函数 (EOP) 近似地表示, 仍可以达到较好的精 度.

本文说明,将浅水声速剖面用少量的参数 表示是可行的。在声场层析和被动定位的工作 中,这将使所搜索的参数大大减少,这具有重 要的意义。



图 11 抚仙湖 97 个样本最大和均方误差沿深度分布



样本序号分布

考 文 献

- 1 Tolstooy A, Diachok O. J. Acous. Soc. Am., 1991 89 (3).
- 2 聂铁军编.数值计算方法.西北工业大学出版社,1989..
- 3 刘钦圣编.最小二乘问题计算方法.北京工业大学出版社, 1984.
- 4 Park J C, Kennedy R M. IEEE J. Oceanic. Eng. 1996, 121(2): 216-224.

应用声学

 $\cdot 25 \cdot$